

УДК 616.314-089.28:004.356.2:615.461

3D-ПЕЧАТЬ В СТОМАТОЛОГИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**Фаттух Яков Ясерович,**

выпускник; Российский университет медицины. 127006, Россия, г. Москва, Долгоруковская улица 4; fattuxy@mail.ru

Аннотация

Масштабное внедрение аддитивного производства весомо преобразует стоматологическую практику. Актуальность работы продиктована форсированным переходом зуботехнических лабораторий от традиционного фрезерования к пространственному синтезу конструкций. Между тем, в профессиональной среде сохраняется фундаментальное противоречие. С одной стороны, фотополимерные аппараты обеспечивают хорошую морфологическую точность, позволяя воссоздавать сложнейшие анатомические детали. С другой, синтетические смолы пока заметно уступают фабричному полиметилметакрилату (ПММА) в прочности на изгиб. К тому же неполная конверсия жидких мономеров провоцирует реальные риски локальной цитотоксичности при контакте со слизистой оболочкой. Цель исследования заключается в системном анализе клинико-лабораторных перспектив 3D-печати сквозь призму биосовместимости и физико-химических свойств применяемых компаундов. Резюмировано, что аддитивные методики утратили статус сугубо экспериментальных, став базовым стандартом зубочелюстной реабилитации. Отмечено, что для сложных клинических сценариев (например, при бруксизме) наиболее надежным решением служит гибридный производственный протокол, которым компенсируется недостаточная прочность фотосмол. Изложенный материал будет полезен оперирующим врачам-стоматологам, специалистам в области медицинского материаловедения.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, биомеханика реставраций, ортодонтические элайнеры, полиметилметакрилат, стоматология, фотополимерные смолы, цитотоксичность

3D PRINTING IN DENTISTRY: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS**Fattukh Yakov Yaserovich,**

graduate; Russian University of Medicine. 127006, Russia, Moscow, Dolgorukovskaya Street, 4; fattuxy@mail.ru

ABSTRACT

large-scale introduction of additive manufacturing is significantly transforming dental practice. The relevance of the work is dictated by the accelerated transition of dental laboratories from traditional milling to spatial synthesis of structures. Meanwhile, a fundamental contradiction persists in the professional environment. On the one hand, photopolymer devices provide good

morphological accuracy, allowing the recreation of the most complex anatomical details. On the other hand, synthetic resins are still noticeably inferior to factory polymethyl methacrylate (PMMA) in flexural strength. Moreover, incomplete conversion of liquid monomers provokes real risks of local cytotoxicity upon contact with the oral mucosa. The aim of the study is a systematic analysis of the clinical and laboratory prospects of 3D printing through the prism of biocompatibility and physicochemical properties of the compounds used. It is summarized that additive methods have lost their status as purely experimental, having become a basic standard of maxillofacial rehabilitation. It is noted that for complex clinical scenarios (for example, in bruxism), the most reliable solution is a hybrid production protocol that compensates for the insufficient strength of photopolymers. The presented material will be useful to practicing dentists and specialists in the field of medical materials science.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, biomechanics of restorations, orthodontic aligners, polymethyl methacrylate, dentistry, photopolymer resins, cytotoxicity

Цифровизация практической медицины объективно меняет устоявшуюся парадигму оказания стоматологической помощи, требуя от врачей пересмотра существующих лечебно-диагностических протоколов. По существу, современная ортопедия, имплантология, ортодонтия предстают теми высокотехнологичными направлениями, где инженерный прогресс напрямую «конвертируется» в повышение качества и безопасности лечения пациентов.

Исторически интеграция систем автоматизированного проектирования и производства (CAD/CAM) положила начало эре точной цифровой стоматологической реабилитации. Между тем, именно масштабное внедрение аддитивных технологий ознаменовало переход от традиционных субтрактивных подходов (механическое фрезерование и т. п.) к принципиально иным, более вариативным моделям пространственного синтеза конструкций [2-5]. В связи с указанным технологическим сдвигом аргументируется необходимость научного осмысления данного феномена.

Как представляется, фокус внимания профильных исследователей сегодня закономерно и обоснованно смещается с сугубо аппаратной или программной оценки оборудования на детализированный анализ физико-химических свойств синтезируемых объектов, их биомеханического потенциала, долгосрочного прогноза функционирования в полости рта. Текущая интенсивная динамика развития медицинской полимерной химии лишь подтверждает эту тенденцию. Практикующие клиницисты всё чаще рассматривают установки объемного формирования не просто как вспомогательный лабораторный инструмент, а в качестве фундаментального технологического «ядра» для реализации концепции персонализированной медицины.

На сегодняшний день в сегменте медицинского 3D-оборудования доминируют несколько ключевых методик отверждения светочувствительных полимеров. Каждая из них обладает специфическими оптическими и физическими параметрами.

Так, наибольшее клиническое распространение получили классическая лазерная стереолитография (SLA), цифровая обработка светом (DLP), прогрессивная масочная стереолитография на базе жидкокристаллических матриц (MSLA). В отличие от предыдущих, субтрактивных подходов, при которых неизбежно требовалось длительное механическое вытачивание заготовки из цельного промышленного блока и имело место образование большого количества отходов, современные фотополимерные аппараты обеспечивают высочайшую геометрическую свободу. Процесс созидания осуществляется путем последовательного, послойного наложения жидкой смолы с последующей

инициацией реакции полимеризации. Это уникальное свойство дает возможность создавать объекты сложнейшей внутренней конфигурации. Она включает скрытые полости и поднутрения, которые физически недоступны для обработки даже пятиосевыми фрезерными станками [2, 4, 5].

Системы проекционной печати нового поколения демонстрируют внушительные показатели пространственной детализации. Разрешение по осям X и Y в актуальных стоматологических принтерах зачастую достигает показателей в 46-50 микрон. По-видимому, планомерная минимизация так называемого эффекта ступенчатости является тем самым главным фактором, который обеспечивает безупречную гладкость поверхности в купе с идеальным краевым прилеганием будущих зубных реставраций. Примечательно, что абсолютная точность позиционирования в трехмерном пространстве очень важна при изготовлении хирургических направляющих шаблонов для дентальной имплантации. Отклонение хирургического сверла при использовании капп, напечатанных на SLA-платформах, находится в пределах строгой клинической нормы. Впрочем, на итоговую пространственную погрешность существенное влияние оказывает размер и протяженность самого направляющего изделия: компактные сегментарные конструкции неизменно показывают более высокую степень конгруэнтности, нежели полночелюстные аналоги [7].

В сопоставлении с более ранними, мануальными протоколами работы, масштабный переход к прямому формированию временных коронок и мостовидных протезов требует тщательного изучения прочностных характеристик используемых синтетических пластмасс. Традиционный заводской полиметилметакрилат (РММА), широко применяемый в субтрактивных фрезерных системах, изготавливается в промышленных условиях при воздействии экстремально высоких температур и колоссального давления. Тем самым обеспечивается абсолютно однородная структура – без микропористостей. Разумно предположить, что жидкие фотополимерные смолы, отверждаемые непосредственно в клинике *in situ*, могут уступать фабричным акриловым дискам по ряду ключевых биомеханических параметров.

Благодаря анализу независимых лабораторных испытаний полностью подтверждается этот научный тезис. В частности, средняя прочность на изгиб у фрезерованного РММА достигает весьма высоких значений – порядка 128 МПа. Одновременно с этим, аналогичный показатель для печатных метакрилатных компаундов колеблется около отметки в 80 МПа [8]. Вследствие этого резюмируем, что для протяженных жевательных мостовидных протезов, регулярно подвергающихся значительным окклюзионным нагрузкам, фрезерованные конструкции пока что объективно сохраняют свое функциональное преимущество. Тем не менее, аддитивные аналоги обладают отличной вязкостью разрушения и эластичностью. Это делает их весьма надежными при создании провизорных одиночных реставраций в эстетически значимой зоне улыбки.

Пристального внимания исследователей требует вопрос на предмет биологической совместимости. Фотополимеризация является сложным химическим процессом. Он редко достигает стопроцентной конверсии жидкого мономера в твердый полимер. Наличие свободных, непрореагировавших частиц способно вызывать выраженный цитотоксический эффект при прямом, пролонгированном контакте со слизистой оболочкой полости рта пациента. Следовательно, строжайшее соблюдение лабораторного регламента финишной очистки и полимеризации служит неременным условием обеспечения клинической безопасности.

Одним из наиболее ярких и показательных примеров клинической эволюции является изменение процесса производства прозрачных ортодонтических капп (элайнеров) [1]. Ранее рассматриваемый технологический алгоритм был исключительно многоэтапным. Он жестко основывался на термическом обжиге полиэтилентерефталатгликолевого (PET-G) листа по заранее синтезированной мастер-модели челюсти. Представленная методика

сопряжена с рядом очевидных физических недостатков. Под агрессивным воздействием вакуума и нагрева исходный листовый пластик неизбежно истончается в области режущих краев зубов. И это непредсказуемо меняет векторы прикладываемой ортодонтической силы и снижает клиническую эффективность лечения.

Между тем, сегодня на глобальном стоматологическом рынке внедряется методология прямого синтеза элайнеров из биосовместимых алифатических реактивов. Исключение промежуточных стадий формирования гипсовых либо пластиковых моделей сводит к минимуму накопление геометрических погрешностей. Инновационные программные платформы помогают проектировать лечебное устройство с вариативной толщиной стенок на разных участках. На основании отмеченного подчеркнем: врач получает возможность математически точно распределять терапевтическое давление, локально усиливая его для сложной ротации корня и аккуратно ослабляя в зонах, которые предрасположены к опасной рецессии десны.

По существу, клиническая успешность внедрения методологии прямого синтеза элайнеров напрямую зависит от объективных характеристик применяемых компаундов. Укажем на необходимость тщательной верификации их свойств. Как представляется, наиболее репрезентативными индикаторами здесь предстают модуль упругости, а также параметры жизнеспособности клеток слизистой оболочки. В сопоставлении с более ранними подходами, которые опираются на традиционное термическое обжигание, инновационные фотополимерные смолы формируют иную биомеханическую и токсикологическую картину.

Разумно предположить, что детальное изучение этих значений позволит практикующим специалистам делать обоснованный выбор. Для предметного понимания текущего уровня развития полимерной химии требуется наглядная систематизация актуальных данных. С целью визуализации указанных различий ниже приведена таблица 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ физико-механических и биологических свойств сырья для термоформования и прямой 3D-печати капш
(составлено на основе [2-5, 9])

Категория компаунда	Коммерческое наименование (тип полимера)	Модуль упругости (МПа)	Жизнеспособность клеток слизистой, %	Уровень цитотоксичности
Для термоформования	Duran (PET-G термопласт)	~ 2200	84,6 (на 14-й день)	Легкий
	SmartTrack (многослойный сополиэфир)	Нет открытых данных	78,8 (на 14-й день)	
Для прямой 3D-печати	Dental LT (метакрилатный олигомер)	~ 2300	62,5 (на 14-й день)	
	Accura 60 (поликарбонатная фотосмола)	2690-3100	24,5 (на 7-й день)	Выраженный

Опираясь на биомеханические закономерности, целесообразно сформулировать конкретные практические рекомендации для оперирующих стоматологов и руководителей зуботехнических лабораторий. Ключевая проблема, которую они призваны действительно решить, – это нивелирование биологических рисков в сочетании с повышением прогнозируемости ортопедического лечения при тотальном переходе на цифровые

протоколы. Новизна предлагаемого подхода состоит в смещении акцента с аппаратного обеспечения на жесткий контроль физико-химических процессов в клинике.

Так, практикующим врачам рекомендуется отказаться от произвольных, нерегламентированных режимов промывки напечатанных изделий. Назначение меры – стопроцентное устранение свободных радикалов, которые являются главным триггером локальной цитотоксичности. Необходимо внедрить использование валидированных производителем ультрафиолетовых полимеризационных камер со строго заданными параметрами длины световой волны и температурного режима.

При тотальном восстановлении окклюзии, особенно у пациентов с подтвержденным бруксизмом, разумно комбинировать цифровые технологии. Суть гибридного протокола выражается в применении быстрой 3D-печати для создания примерочных диагностических макетов. А финальные долгосрочные провизорные конструкции должны фрезероваться из монолитных заводских блоков РММА. Благодаря описываемому подходу компенсируется пока еще недостаточная прочность фотосмол на изгиб.

Для перманентного поддержания заявленной геометрической точности хирургических шаблонов следует внедрить обязательный протокол еженедельного тестового формирования калибровочных кубов. Назначение этого важного шага – своевременная программная компенсация естественной деградации светодиодных матриц принтера и усадки фотополимеров. Из-за характеризуемого нововведения сгладится риск фатальных ошибок при остеотомии.

Резюмируя, отметим, что 3D-печать в современной стоматологии преодолела статус сугубо экспериментальной, нишевой методики. Сегодня эта технология планомерно, но уверенно переходит в разряд базового, стандартизированного клинического инструмента. Им определяются векторы развития всей зубочелюстной реабилитации. В дальнейших изысканиях перспективным видится изучение богатого потенциала так называемой 4D-печати. В ней задействуются инновационные «умные» компаунды, обладающие эффектом памяти и способны самостоятельно изменять свою форму под воздействием нормальной температуры полости рта пациента [6]. В «технологической гонке» долгосрочное лидерство удержат именно те специалисты, которые сумеют своевременно и грамотно адаптировать свои мануальные навыки к этим сложным, но многообещающим реалиям биомедицинской инженерии.

Список литературы:

1. Гнетов, О.А. Развитие 3D-печати в стоматологии: как аддитивное производство трансформирует изготовление протезов, коронок, элайнеров и хирургических шаблонов / О.А. Гнетов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 6-1 (105). – С. 39-51.
2. Карапетян, А.А. 3D-печать из металлов в стоматологии / А.А. Карапетян, М.М. Уханов, А.Н. Ряховский // Стоматология. – 2022. – Т. 101. – № 5. – С. 85-91.
3. Луцкая, И.К. Аддитивные технологии и 3D-печать в медицине и стоматологии / И.К. Луцкая // Современная стоматология. – 2025. – № 2 (95). – С. 13-16.
4. Сагиров, М.Р. Применение 3D-печати в стоматологии (краткий обзор литературы) / М.Р. Сагиров, А.М. Нестеров, Н.В. Попов, М.И. Садыков // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. – 2025. – Т. 19. – № 6. – С. 62-66.
5. Якимов, И.А. Применение 3D-печати и 3D-сканирования в стоматологии / И.А. Якимов, И.И. Шарипов // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 110-16. – С. 195-199.

6. Ebrahimi, H. 4D-Printed Smart Materials in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review / H. Ebrahimi, S. Khosravi S // Galen Med J. – 2025. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12881717/> (дата обращения: 07.08.2026).
7. Rouzé l'Alzit, F. Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology // F. Rouzé l'Alzit, R. Cade, A. Naveau, J. Babilotte, M. Meglioli, S. Catros // Journal of dentistry. – 2022. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34852291/> (дата обращения: 07.08.2026).
8. Shenoy, A. Comparative analysis of various temporary computer-aided design/computer-aided manufacturing polymethyl methacrylate crown materials based on color stability, flexural strength, and surface roughness: An in vitro study // A. Shenoy, V. Rajaraman, S. Maiti // J Adv Pharm Technol Res. – 2022. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9836163/> (дата обращения: 07.08.2026).
9. Tartaglia, G.M. Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities / G.M. Tartaglia, A. Mapelli, C. Maspero et al. // Materials (Basel). 2021. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8038630/> (дата обращения: 07.08.2026).

References:

1. Gnetov, O.A. Development of 3D printing in dentistry: how additive manufacturing is transforming the production of prostheses, crowns, aligners and surgical templates / O.A. Gnetov // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2025. – No. 6-1 (105). – Pp. 39-51.
2. Karapetyan, A.A. 3D printing of metals in dentistry / A.A. Karapetyan, M.M. Ukhanov, A.N. Ryakhovsky // Dentistry. – 2022. – Vol. 101. – No. 5. – Pp. 85-91.
3. Lutsкая, I.K. Additive technologies and 3D printing in medicine and dentistry / I.K. Lutsкая // Modern Dentistry. – 2025. – No. 2 (95). – Pp. 13-16.
4. Sagirov, M.R. Application of 3D printing in dentistry (brief literature review) / M.R. Sagirov, A.M. Nesterov, N.V. Popov, M.I. Sadykov // Bulletin of New Medical Technologies. Electronic edition. – 2025. – Vol. 19. – No. 6. – Pp. 62-66.
5. Yakimov, I.A. Application of 3D printing and 3D scanning in dentistry / I.A. Yakimov, I.I. Sharipov // Trends in the Development of Science and Education. – 2024. – No. 110-16. – Pp. 195-199.
6. Ebrahimi, H. 4D-Printed Smart Materials in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review / H. Ebrahimi, S. Khosravi S // Galen Med J. – 2025. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12881717/> (accessed: 08/07/2026).
7. Rouzé l'Alzit, F. Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology // F. Rouzé l'Alzit, R. Cade, A. Naveau, J. Babilotte, M. Meglioli, S. Catros // Journal of dentistry. – 2022. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34852291/> (accessed: 08/07/2026).
8. Shenoy, A. Comparative analysis of various temporary computer-aided design/computer-aided manufacturing polymethyl methacrylate crown materials based on color stability, flexural strength, and surface roughness: An in vitro study // A. Shenoy, V. Rajaraman, S. Maiti // J Adv Pharm Technol Res. – 2022. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9836163/> (accessed: 08/07/2026).

9. Tartaglia, G.M. Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities / G.M. Tartaglia, A. Mapelli, C. Maspero et al. // Materials (Basel). 2021. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8038630/> (accessed: 08/07/2026).